

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

FRÉZOVÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH SOUČÁSTÍ **PRO LETECKÝ PRŮMYSL**

MILLING OF THIN-WALLED PARTS FOR AIRCRAFT INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JONÁŠ LEKEŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2011

Zadání

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá zpočátku materiály používanými v leteckém průmyslu, pak teoretickou analýzou a predikcí vychýlení stěny a nástroje při obrábění tenkostěnných součástí. Dále se zabývá popisem metody NC kompenzace chyb, která na základě modelování sil, nástroje a obrobku určí a poté minimalizuje tuto výchylku. Závěrečná část práce popisuje experiment s výsledky vychýlení pomocí různých výpočtových a měřicích technik.

Klíčová slova

Tenkostěnná součást, NC kompenzační metoda, vychýlení součásti

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with materials used in the aircraft industry, then theoretical analysis and prediction of deflection of plate and tool when machining a thin-walled piece. Then it describes an NC error compensation method, which define and minimizes a part deflection with use of three dimensional cutting force model and modeling of part and tool. Final part is about practical experiment where different computational and measuring techniques where applied to determine a part deflection.

Key words

Thin-walled part, NC error compensation method, part deflection

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LEKEŠ, Jonáš. *Frézování tenkostěnných součástí pro letecký průmysl: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 44 s., bez příloh., vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Frézování tenkostěnných součástí pro letecký průmysl vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 25. 5. 2011

.....
Jonáš Lekeš

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a Ing. Davidu Pratovi za jeho čas a pomoc při experimentech.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
1 Úvod do problematiky	9
1.1 Geometrie součásti.....	9
1.2 Nestabilita součásti.....	9
2 materiály	11
2.1 Slitiny hliníku	11
2.1.1 Rozdělení slitin hliníku.....	11
2.1.2 Obrobitelnost hliníkových slitin	12
2.2 Slitiny titanu	12
2.2.1 Rozdělení slitin titanu	13
2.2.2 Obrobitelnost titanových slitin.....	14
2.3 Slitiny niklu	15
2.3.1 Obrobitelnost niklových slitin	15
3 Technologie frézování	16
3.1 Frézování Waterline a Step Support.....	16
3.2 Dvojitá pozitivní geometrie	17
4 Statické a dynamické namáhání	18
4.1 Vychýlení součásti.....	18
4.2 Vychýlení nástroje	21
5 NC kompenzační metoda	23
5.1 Modelování složek silového zatížení	23
5.2 Model tenkostěnné součásti	25
5.3 Model nástroje	26
5.4 Optimalizace trajektorie nástroje	27
6 Praktický experiment	29
6.1 Realizace součásti a pozorování deflekcí.....	29
6.1.1 Čelní frézování geometrie součásti	29
6.1.2 Kontrola tvaru stěny	29
6.1.3 Válcové frézování na volném konci stěny	31
6.1.4 Měření vychýlení	31
6.2 Výpočet složek silového zatížení.....	34
6.3 Výpočet vychýlení součásti	36
6.4 Modelizace součásti v programu CATIA.....	37
Závěr.....	39
Seznam použitých zdrojů	40
Seznam použitých zkratk a symbolů	42

ÚVOD

Obrábění tenkostěnných součástí je jednou z hlavních problematik v leteckém průmyslu. Musí se provádět z hrubého polotovaru, přičemž jeho převážná část odejde jako tříska. V praxi to může být až 95% odpadu při obrábění tzv. kapes. Je to nákladné, ale bohužel jediné řešení. Odlití takto tenké stěny totiž není konvenčními metodami dosažitelné a tvářením mohou vznikat strukturní nedokonalosti a trhliny, což by u takového stroje jako letadlo mohlo vést k případné katastrofě a ztrátě na životech.

Obrobení frézováním ale přináší také spoustu technologických obtíží. Musí se předejít tomu, aby při obrábění stěny nedošlo k jejímu prasknutí vlivem řezné síly, vibrací nebo tepelného namáhání.

Kvůli malé tuhosti je také velmi snadné při obráběcím procesu stěnu vychýlit. Vychýlení vzniká především při obvodovém frézování této stěny. Při simulaci těchto jevů se obráběcí nástroj předpokládá jako stabilní, protože jeho deformace oproti deformaci stěny není velká. V reálném procesu je to však i nástroj, který se vychyluje a vibruje.

Obvodové frézování málo tuhých součástek je rozšířený výrobní proces hlavně v leteckém průmyslu. Proces je to komplikovaný díky periodicky se měnícím silám, které staticky a dynamicky namáhají jak nástroj, tak i obrobek, a které vedou k nezanedbatelným a nepředvídatelným vychýlkám. Statické vychýlky produkují rozměrové chyby, dynamické mikroposuvy se nepříznivě podepisují na kvalitě obrobené plochy. [14]

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

1.1 Geometrie součástí

Z geometrického hlediska je obrobek charakterizován tloušťkou stěny a dna, výškou stěny, ale také rádiusy mezi stěnami a mezi stěnou a dnem. V leteckém průmyslu je časté obrábění kapes, kdy je potřeba obebrat velké množství materiálu kvůli úspoře hmotnosti, jako jsou třeba součásti do trupu či křídel letadla. V takovém případě je tenká stěna i dno.



Obr. 1.1 Směrová klapka v křídle [2]

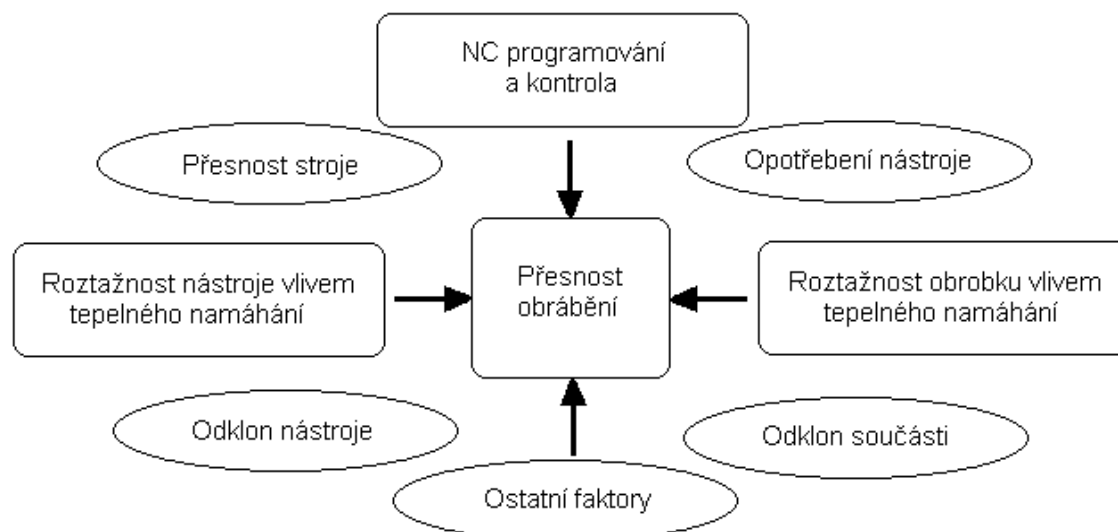
1.2 Nestabilita součástí

U takto tenkých součástí je deflekce kritickým problémem, který může vyústit v jak nepřesnost geometrickou, tak i ve špatnou drsnost povrchu. Díky NC kompenzačním metodám lze tyto chyby sledovat a účinně odstranit volbou správné trajektorie frézy. Odstranění těchto chyb může mít v praxi dvojí podobu. Je to kompenzace buďto přímá nebo nepřímá. Přímá metoda je měření v průběhu obrábění pomocí měřicích přístrojů přímo na stroji. Data jsou odeslána do počítačové jednotky, tam zpracována a pak je správná trajektorie nástroje pomocí servomotorů přizpůsobena tak, aby výsledná součást odpovídala předepsaným parametrům [16]. Nepřímá metoda je v [16] popsána jako superpozice tří základních chyb, které při obrábění vznikají. Tyto chyby jsou způsobeny nedokonalou geometrií součásti, výchylnou nástroje a nepřesností způsobenou nedostatečnou tuhostí celku stroj-nástroj. Každá z nich je analyzována samostatně a výsledný chybový vektor je určen pomocí všech tří.

Výchylka při obrábění se dá získat díky relativnímu posunutí stěny na volném konci. Tyto deformace se dají experimentálně vypočítat a obrábění jim přizpůsobit. V praxi se zjistí velikost silového zatížení a pomocí metody konečných prvků lze zjistit, k jakému vychýlení při obrábění dojde. Díky NC kompenzaci fréza na volném konci stěny zajede do materiálu víc, ale kvůli

vychýlení vlastně odebere přesně takové množství, které je potřeba. Tím lze dosáhnout vysoké přesnosti a efektivity.[15]

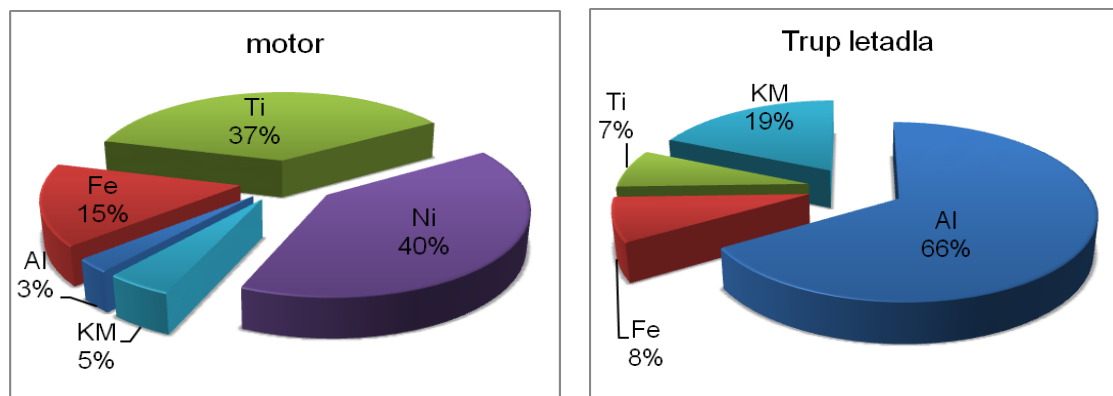
Hodně výzkumů se zaměřuje na predikce vychýlení a deformací [4, 11, 13, 14, 15], jiné na analýzu pomocí metody konečných prvků [3, 6, 17] a další zase na analýzu silového zatížení [3, 9, 11].



Obr.1.2 Faktory ovlivňující přesnost obrábění [15]

2 MATERIÁLY

Nejvíce používané materiály pro letecký průmysl jsou slitiny hliníku, titanu a niklu. Oproti čistému stavu mají jejich slitiny lepší mechanické vlastnosti. Důvod jejich použití je také kvůli úspoře hmotnosti a tím úspoře paliva. Obr. 2.1 ukazuje přibližné zastoupení leteckých materiálů v motoru a trupu letadla.



Obr. 2.1 Procentuální zastoupení materiálů v letadle

2.1 Slitiny hliníku

Hliník (Al) je velmi používaný kov hlavně díky vlastnostem jako nízká hustota ($\rho=2700 \text{ kg/m}^3$), dobré únavové vlastnosti, odolnost proti korozi, snadná montáž a obrobitelnost, nízká cena, velké zásoby v zemské kůře a dostupnost. Pro letecký průmysl se používají slitiny hliníku, které se vyznačují lepšími mechanickými vlastnostmi jako je např. tvrdost, pevnost, vyšší teplota tání nebo odolnost vůči chemickým vlivům. Používá se též tepelné zpracování, které při správně dodrženém postupu zvýší tvrdost i pevnost.

2.1.1 Rozdělení slitin hliníku

Hliníkové slitiny lze podle EN 573 dělit na tyto třídy [20]:

Tab. 2.1 Rozdělení slitin hliníku podle legujících prvků.

třída	legující prvek
1000	Al čistoty min 99%
2000	Cu
3000	Mn
4000	Si
5000	Mg
6000	Mg+Si
7000	Zn
8000	jiné prvky

V leteckém průmyslu se používají převážně tyto třídy:

Třída 2000 – obsahují přídavek Cu

Velmi používaná je slitina EN AW 2024 (ISO AlCu4Mg1, dle ČSN 42 4203), která se nazývá superdural. Obsahuje 4,4% Cu, 1,5% Mg, 93,5% Al, hustota je 2770 kg/m^3 , mez kluzu 275 MPa a s dalším přidáním Cu se až dvojnásobně zvýší. Je lehce obrobitelný, ale hůře svařitelný [10].

Slitina EN AW 2219 -operační teplota 270 až 300 °C, dobře svařitelná, používá se pro trupy nadzvukových letadel, horší korozní odolnost [10].

Třída 6000-přídavek Mg a Si

Pro svou dobrou svařitelnost se používá slitina EN AW 6061 (ISO AlMg1SiCu)

Třída 7000 -přídavek Zn

V praxi je používaná slitina EN AW 7075 (ISO AlZn6Mg2Cu, dle ČSN 42 4222). Zinek zlepšuje mechanické vlastnosti, ale klesá schopnost odolávat korozi [10].



Obr. 1.2 Součást rámu ze slitiny hliníku [2]

2.1.2 Obrobitelnost hliníkových slitin

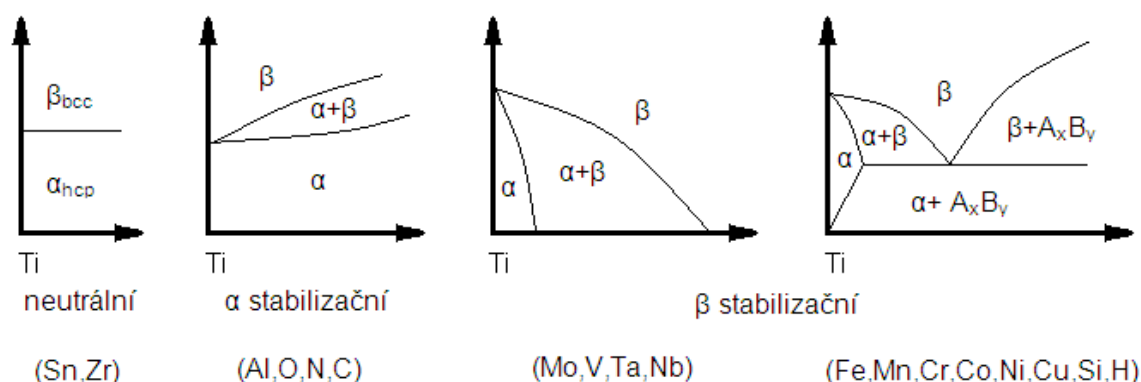
„Slitiny hliníku jsou považovány za snadno obrobitelné materiály, protože řezné síly, které při obrábění vznikají, jsou relativně malé” [7]. Přídavek hořčíku a mědi ještě zlepšuje obrobitelnost. Problémem je však vznik nárůstku na nástroji vlivem vysokých teplot v místě kontaktu nástroje a obrobku. Lze jej však odstranit použitím chladicí kapaliny. Přítomnost velkých zrn křemíku obrobitelnost zhoršuje, protože jsou velmi tvrdé ($>400 \text{ HV}$) a teplota tání křemíku je 1420°C . Proto se také často obrábí polykrystalickým diamantem [18]. V praxi se využívá vysokorychlostní frézování, které snižuje řeznou sílu.

2.2 Slitiny titanu

Titan je těžkovitavý kov ($T_t - 1668^\circ\text{C}$, železo – 1539°C) s vysokou tvrdostí a je těžké ho odlévat. Za pokojové teploty se nazývá α titan, má hexagonální mřížku (hcp) s těsným uspořádáním, která se mění na kubickou prostorově středěnou (bcc), tzv. β titan, při teplotě $882\pm 2^\circ\text{C}$. V letectví je

používaný kvůli lepším mechanickým vlastnostem než Al. Je lehčí než ocel ($\rho=4506 \text{ kg/m}^3$, ocel - 7850 kg/m^3). Slitiny Ti jsou používány na součásti podvozku, které jsou velmi mechanicky namáhány, hlavně šokem, ale také pro součásti motoru, které jsou naopak vystaveny vysokým teplotám. Využívá se i jako krytina pro kosmické objekty.

„Podle vlivu na překrystalizační teplotu se legující prvky klasifikují jako neutrální, α stabilizační a β stabilizační.“ (Obr. 1.3) [19]



Obr. 1.3-Vliv legujících prvků na překrystalizační teplotu [19]

2.2.1 Rozdělení slitin titanu

Slitiny Ti dělíme do 3 hlavních skupin: α , β , $\alpha+\beta$ [5, 19]. Shrnutí jejich vlastností je popsáno v Tab. 2.2.

α slitiny

Do α -slitin se řadí téměř čistý titan a jeho slitiny s neutrálními (Sn, Zr) a/nebo α stabilizačními prvky (Al, O, N, C). Mez kluzu 170-480 MPa, mez pevnosti 240-740 MPa, dobrá svařitelnost a korozivzdornost, neupravují se tepelně, použití za zvýšených teplot. S přidavkem Si se zvýší odolnost proti creepu.

Příklady (dle EN): Ti-3Al-2,5V, Ti-5Al-2,5Sn, Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0,25Si

$\alpha+\beta$ slitiny

Nejčastěji používané, přidavek β stabilizačních prvků je mezi 5-40 %, spojuje výhody a nevýhody α a β slitin, operační teplota mezi 315 a 400 °C. Slitina Ti-6Al-4V tvoří 50 % využití všech titanových slitin a je nejvíce využívána v leteckém průmyslu.

Příklady (dle EN): Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo

β slitiny

Přídavek β stabilizačních přesahuje 50 %. Představují dobrou kombinaci pevnosti (mez pevnosti až 1380 MPa), houževnatosti a únavové odolnosti.

Dobrá tvárnost i za nízkých teplot, svařitelné elektronovým paprskem. Nevýhodou je však vysoká cena.

Příklady (dle EN): Ti-10V-2Fe-3Al, Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn, Timetal 21S (Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si) a Beta-C (Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr)

Tab. 2.2 Vlastnosti α , $\alpha+\beta$ a β slitin [19]

	α	$\alpha+\beta$	β
hustota	+	+	-
pevnost	-	+	++
tažnost	-/+	+	+/-
lomová houževnatost	+	-/+	+/-
žárupevnost	+	+/-	-
korozivzdornost	++	+	+/-
svařitelnost	+	+/-	-
tvárnost za studena	--	-	-/+



Obr. 1.4 Součásti motoru z titanových slitin [2]

2.2.2 Obrobitelnost titanových slitin

Teploty v zóně řezu mohou dosahovat až 900 °C a kvůli vysokým tlakům je vyloučeno používat rychlořeznou ocel. Proto se používají slinuté karbidy, přičemž CVD povlakování může zvýšit trvanlivost nástroje [18]. Velmi často se používají destičky kruhové díky lepší stabilitě. U těchto materiálů se pro úsporu strojních časů používají frézy s malou roztečí zubů, kdy je potřeba použít nižší řeznou rychlost. Jsou také vhodné pro použití tam, kde je vyžadován hladicí řez jako např. u obrábění tenkostěnných součástek. U těch je ale třeba použít vysoké řezné rychlosti kvůli snížení specifického řezného tlaku. [7]

2.3 Slitiny niklu

Nejpoužívanější slitinou je Inconel. Je složen z Ni (72%), Cr (14-17%) a Fe (6-10%). Používá se ve vysokých teplotách, protože velmi dobře odolává creepu a korozi. Má široké využití do součástek leteckých motorů.



Obr. 1.5 Součásti motoru z inconelu [2]

2.3.1 Obrobitelnost niklových slitin

Tyto slitiny jsou velmi těžce obrobitelné, v malých řezných rychlostech se tvoří nárůstek a při zvýšení řezné rychlosti mohou teploty v zóně řezu dosáhnout až 1000°C. Zde také dochází velmi často k poškození destičky vlivem střížných a tlakových napětí. Řezné rychlosti se pohybují v řádech několika mála desítek m/min. Pro obrábění se používají povlakované SK. [18]

3 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

3.1 Frézování Waterline a Step Support

Pro dosažení lepší kontrolovatelnosti během obrábění je potřeba zachovat celou řadu parametrů neměnných, jako třeba posuv, hloubku řezu nebo objem třísky. Tyto parametry nám pak pomohou lépe studovat silové zatížení, mechanické namáhání nástroje a tím pak ovlivnit výslednou drsnost povrchu.

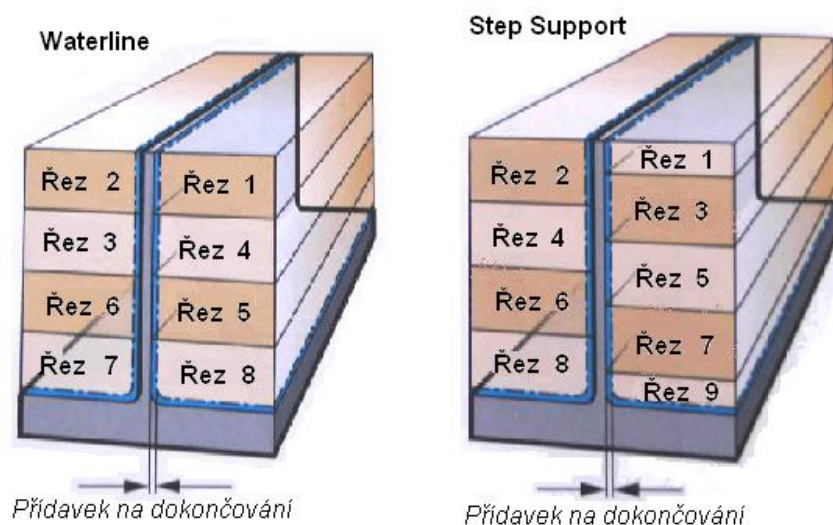
Během obrábění také vznikají vibrace. Způsobují je různé jevy, při obrábění tenkostěnných součástí je to samotná stěna, nebo nástroj, který má velkou délku oproti průřezu. Při vysokorychlostním obrábění je nevyhnutelné znát tyto vibrace a umět s nimi pracovat. Je tedy potřeba zajistit maximální možnou tuhost obrobku. Jedním ze způsobů takového obrábění je střídavé obrábění stěny. Vždy se odebere určitá hloubka materiálu, a ta se pak odebere i z druhé strany stěny. To zapříčiní, že stěna má lepší tuhost díky neodebranému materiálu, o který se opírá. V tom případě pak nedojde k takovému vychýlení. Je vždy samozřejmostí nechat přídavek na dokončování [3].

Takovéto obrábění má více stupňů, zaleží na poměru výšky proti tloušťce. Když poměr výšky k tloušťce je menší než 15:1, používají se pouze střídavé kroky, axiální šířka kroku může být různě velká.

Když je poměr výšky k tloušťce menší než 30:1, používají se dva možné způsoby obrábění stěny:

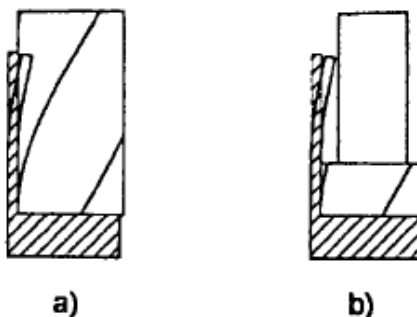
„Vodorovné frézování“ (Waterline milling) - střídavé obrábění stěny vždy ve stejné výšce (Obr. 3.1).

„Frézování překrývaným krokem“ (Step-support milling) - odebere se materiál z jedné strany, pak se odebere z druhé 2x tolik. Pak každý další střídavý krok má tuto hodnotu, tím se pokaždé stěna půl kroku opírá o neobrobenou část, a jakmile přejde tuto vodorovnou linii tak odebere ještě druhou půlku kroku. Tyto přecházející kroky se používají pro ještě lepší podporu, stabilitu a tuhost stěny při frézování [8, 12].



Obr. 3.1 Frézování „Waterline“ a „Step Support“ [8, 12]

Při frézování posledních kroků čelní válcovou frézou však hrozí zničení volného kmitajícího konce stěny. Proto je třeba použít takovou frézu, například kotoučovou, která obrábí větším průměrem, než kterým je upnutá ve sklíčidle, aby se volný konec stěny mohl volně hýbat.



Obr. 3.2 a) použití čelní válcové frézy při kterém hrozí porušení obrobené stěny, b) použití stopkové kotoučové frézy [1]

3.2 Dvojitá pozitivní geometrie

Při frézování tenkostěnných součástí se používá nejčastěji dvojitá pozitivní geometrie. To znamená, že oba úhly čela jsou pozitivní (radiální i axiální). Tloušťka třísky je omezena což má za následek menší řezné síly a tím není obrobek tolik namáhán. Frézování s úhlem nastavení hlavního ostří 90° může mít za následek vylamování hran. Používají se pro to jednostranné pozitivní vyměnitelné destičky. Toto obrábění je mnohdy ale nevyhnutelné, např. při obrábění hliníku, korozivzdorných či žáruvzdorných materiálů, kdy se jinak při něm tvoří na nástroji nárůstek. [7]

4 STATICKÉ A DYNAMICKÉ NAMÁHÁNÍ

Dosažení předepsané přesnosti při obvodovém frézování tenkostěnných součástí je jedním z hlavních problémů, se kterými se při tomto obrábění setkáváme. Obrobek je málo stabilní a při obrábění se vychyluje a to nejvíce na volném konci, který je velmi nestabilní. Kvůli tomu pak výsledná stěna není rovná, ale na volném konci širší. Neustále se také mění řezné podmínky a obrobek je namáhám jak staticky, tak i dynamicky. Statické namáhání způsobuje vychýlení a tudíž geometrické nepřesnosti. Dynamické namáhání, jako jsou třeba vibrace stěny a nástroje, pohyb vřetena nebo vychylování frézy, způsobuje zhoršenou drsnost povrchu. Dobré upnutí obrobku a přesné vyložení nástroje jsou důležitými faktory minimalizování těchto chyb. Ani CNC obrábění nemůže zaručit předepsané geometrické parametry, může se tak stát, že stěna bude na volném konci tlustější než na vetknutém konci.

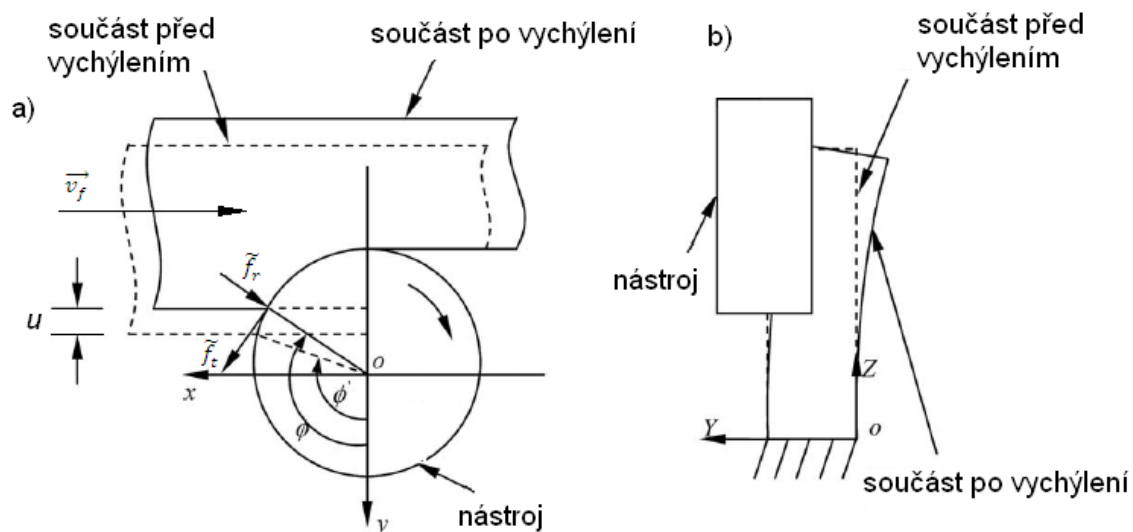
Strategie k minimalizování těchto chyb jsou:

- preventivní, tzn. eliminace chyb a
- kompenzace chyb.

Eliminace chyb začíná už při samotném navrhování nástroje, kdy musí být vysoké nároky na přesnost a na pevnost frézy, ale také nároky na stroj, na jeho celkový stav. Je třeba proto minimalizovat jakýkoli zdroj nepřesností. Tím se samozřejmě zvyšují celkové náklady obrábění [13]. Kompenzace chyb spočívá v odhadu, jak velká chyba při obrábění vzniká, a pokud známe její velikost, můžeme ji účinně odstranit. Toto je osvědčená technika, v moderním průmyslu jsou kladeny vysoké nároky na přesnost a na nízkou cenu, což takhle varianta splňuje. Základem je dobrá simulace průběhu obrábění. Používají se pro to CAE/CAD/CAM programy, díky nimž lze pak optimalizovat strategie řezu a stopu nástroje. Odstranění chyb statického namáhání zahrnuje předpověď složek silového zatížení a vychýlení součásti [3]. Poslouží k tomu také programy používající metodu konečných prvků, jako třeba ANSYS [4]. Díky dobré modelizaci a předpovědi chyb může být stopa nástroje optimalizována a dosáhne se tím předepsaných geometrických tolerancí.

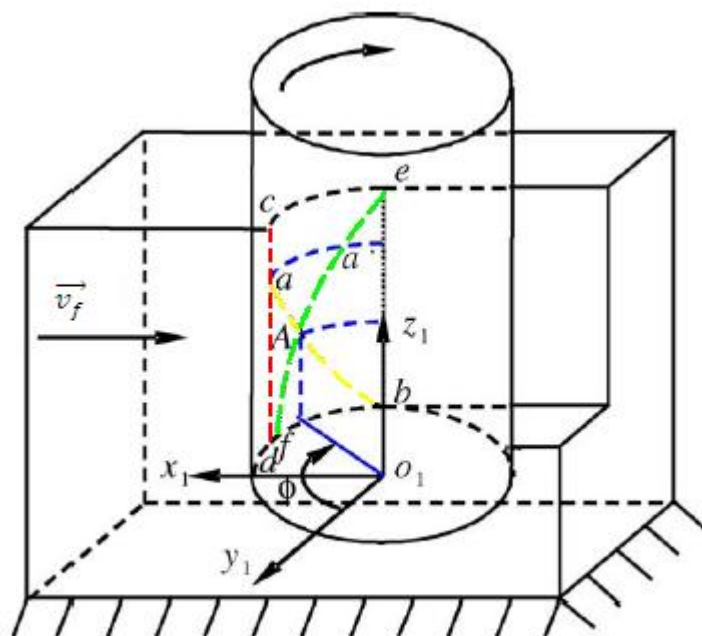
4.1 Vychýlení součásti

Vlivem radiální a tečné síly f_r a f_t je součást při záběru zubu odkloněna od své původní polohy o hodnotu u (Obr. 4.1) a materiál, který má být odebrán, odebrán není. Po obrábění se stěna vrátí do původního stavu zpětnou elastickou deformací a není dodržena geometrická přesnost.



Obr.4.1 Simulace vychýlení součásti vlivem silového zatížení při obrábění. a) Pohled shora podél osy z, b) Pohled z boku podél osy x [14].

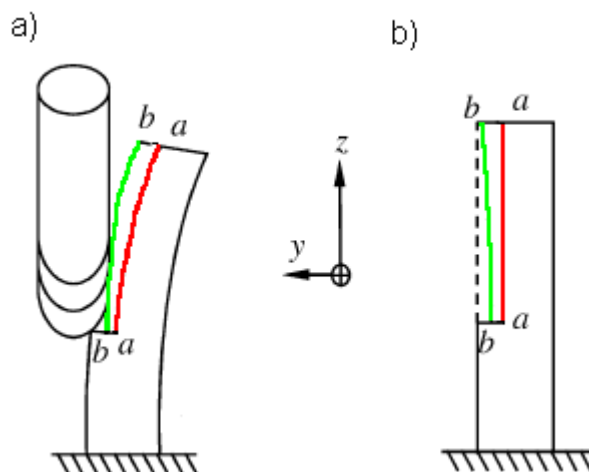
V [13] je situace vysvětlena podrobněji. Jakmile se fréza dotkne stěny, je stěna ihned vychýlena. Červená úsečka $c - a - d$ značí kontakt stěny s frézou a v tomto místě by měla fréza do materiálu vniknout. V důsledku řezných sil a malé stability stěny se však vychýlí do zelené křivky $e - a' - A - f$. Bod a se tedy na obrobku vychýlí do bodu a' , tím však není odebrán potřebný materiál. Žlutá úsečka ab je ostří frézy a vychýlením stěny začne obrábět až v bodě A (Obr. 4.2). Souřadný systém je lokální a pohybuje se s nástrojem.



Obr. 4.2 Vychýlení nestabilní součásti vlivem frézy [13]

Po skončení frézování se pak stěna zpětnou elastickou deformací vrátí do své původní polohy, a lze pozorovat geometrickou nepřesnost. Obr. 4.3 ukazuje

červenou úsečku aa , která má být správně odebrána. Ta se však vychýlí a je odebrán materiál pouze podél zelené křivky bb .

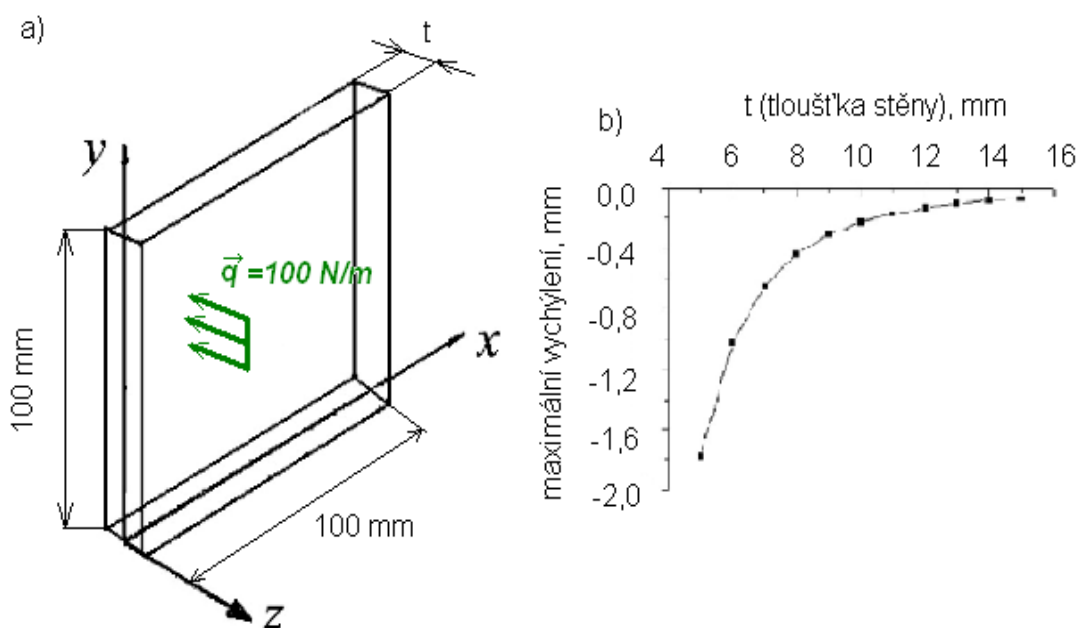


Obr. 4.3 Průhyb součásti. a) Vychýlení při obrábění, b) Zpětná elastická deformace a návrat do původní polohy [13]

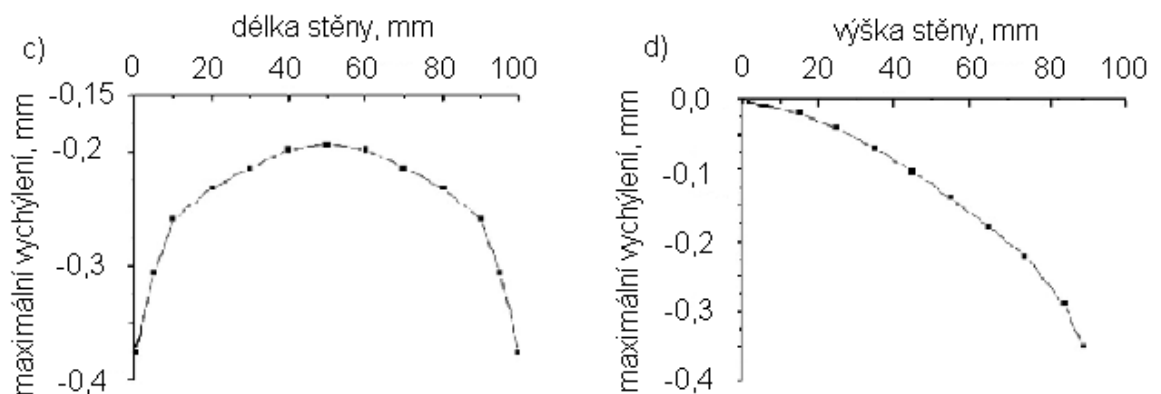
V [4] se autor zabývá mírou vychýlení stěny pod vypočteným lineárním zatížením v závislosti na 3 různých faktorech:

- velikosti zatížení
- tloušťce stěny
- pozice aplikace zatížení.

Obr. 4.4 a Obr. 4.5 ukazují vliv posledních dvou. Aplikací spojitého zatížení na různá místa součásti lze pozorovat, že v ose y se se vzdáleností od počátku zvětšuje výchylka. Pokud se však zatížení pohybuje v ose x , je patrná také výchylka na okrajích stěny, způsobená menší stabilitou oproti středu stěny.



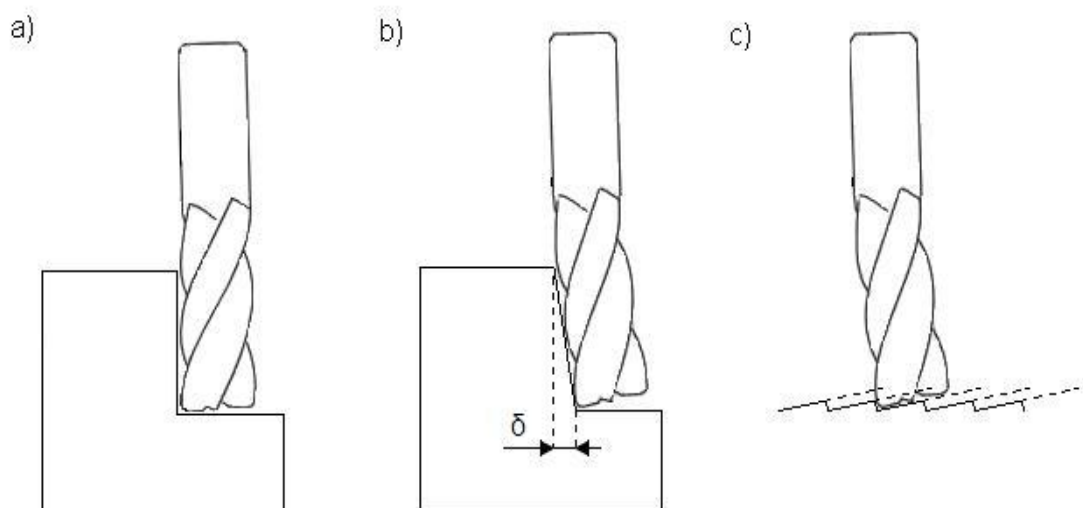
Obr. 4.4 a) Souřadný systém a rozměry součásti, b) Vliv tloušťky stěny na vychýlení [4]



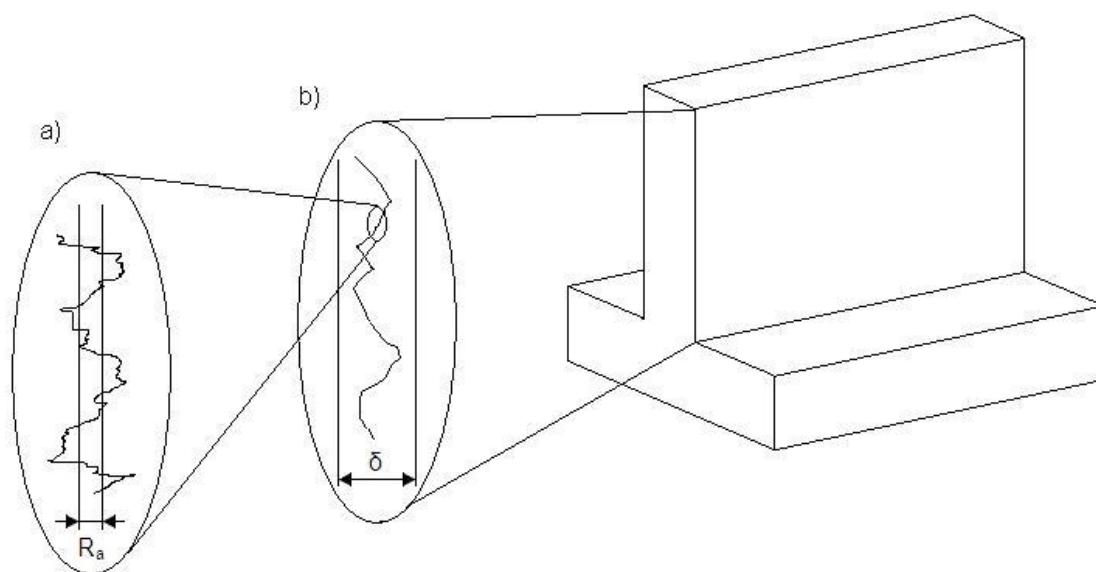
Obr. 4.5 Vliv pozice nástroje v c) ose x, d) ose y na maximální vychýlení [4].

4.2 Vychýlení nástroje

Problematika zabývající se obráběním tenkostěnných součástí často uvažuje stěnu jako jediný flexibilní prvek. Při obrábění tenkostěnných součástek se však používají stopkové frézy, které se se svou délkou vyložení mohou stát rovněž flexibilními. Takto vychýlený nástroj pak neobrábí správně a vzniká tvarová odchylka a zhoršuje se kvalita obrobeného povrchu, Obr. 4.6.



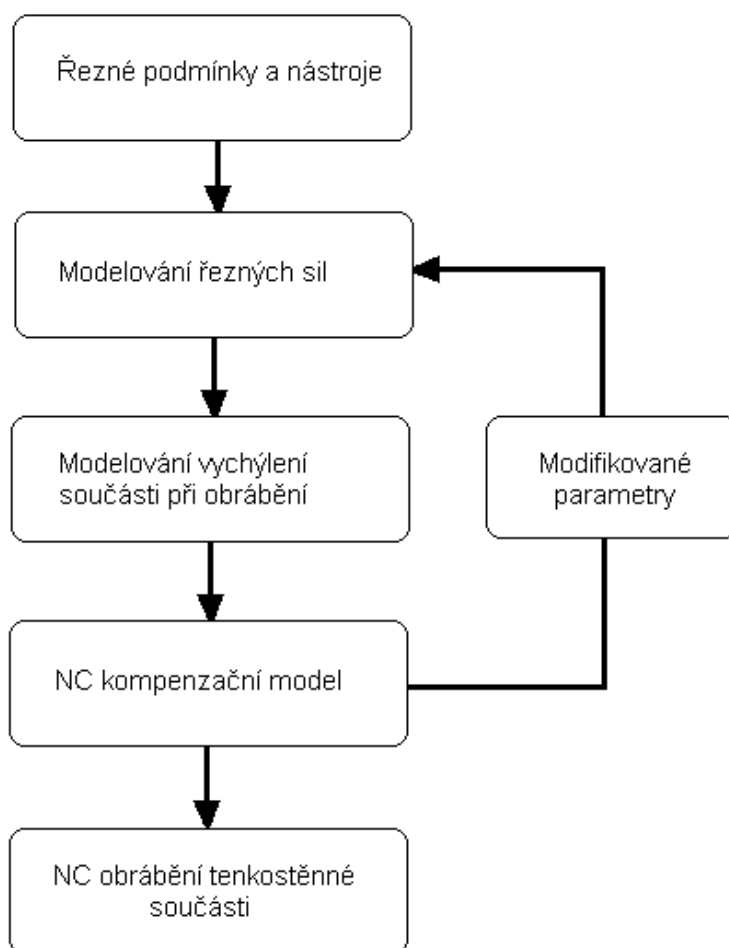
Obr. 4.6 Vychýlení nástroje vlivem velkého vyložení. a) Ideální geometrie, b) Tvarová odchylka, c) Kvalita obrobeného povrchu [18]



Obr. 4.7 Odchylky od požadované přesnosti. a) Drsnost povrchu, b) Odchylka tvarová [18]

5 NC KOMPENZAČNÍ METODA

Tato metoda sestává z modelování řezných sil, potom modelování vychýlení součásti, a nakonec samotné NC kompenzace, v Obr. 5.1. Díky ní je možné odhadnout míru vychýlení součásti a přizpůsobit jí stopu nástroje. Modelování silového namáhání zahrnuje rozložení síly do složek a určení jejich velikosti na fréze při určitých řezných podmínkách. Modelování vychýlení součásti a nástroje se dělá pomocí MKP, kde je možné zahrnout síly, geometrii součásti a po spuštění výpočtu pozorovat kde a do jaké míry dochází k odklonu stěny. NC kompenzační metoda pak spočívá v tom, že když v každém bodě trajektorie je známá deflekce stěny od požadované hodnoty, je možné tuto deflektci kompenzovat.



Obr. 5.1 NC kompenzační systém pro obrábění tenkostěnných součástí [15]

5.1 Modelování složek silového zatížení

V [9] se autor zabývá analytickým modelem tří rozměrných řezných sil a určení konstant měrných řezných sil. Břit stopkové frézy je rozložen na dílky o

velikosti dz a tloušťky h , jak jde vidět na obr. 5.2c). Tato tloušťka závisí na posuvu na zub f_z a úhlu θ , což je úhel v kterémkoli místě záběru frézy.

$$h = f_z \cdot \sin\theta \quad (5.1)$$

$$\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (5.2)$$

Nejdříve je nutné vyjádřit sílu v lokálním místě řezu pomocí tečné, radiální a axiální složky, Obr. 5.2. Lokální tečná složka síly \tilde{f}_t je závislá na tečné konstantě k_t a h , kde k_t je závislá na podmínkách frézování, obráběném a obráběcím materiálu. Radiální a axiální složka \tilde{f}_r a \tilde{f}_a jsou na \tilde{f}_t závislé [9].

$$\tilde{f}_t(\theta) = k_t \times h \times dz \quad (5.3)$$

$$\tilde{f}_r = k_r \times \tilde{f}_t \times dz \quad (5.4)$$

$$\tilde{f}_a = k_a \times \tilde{f}_t \times dz \quad (5.5)$$

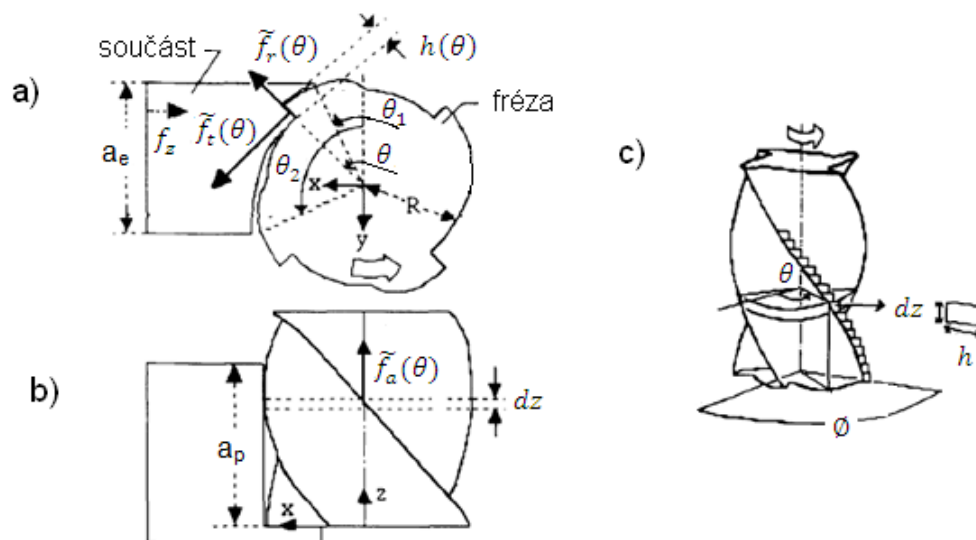
Protože se však tyto složky podél šroubové frézy mění, je třeba je převést do kartézské souřadné soustavy.

$$\begin{bmatrix} \tilde{f}_x(\theta) \\ \tilde{f}_y(\theta) \\ \tilde{f}_z(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ \sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \tilde{f}_t(\theta) \\ \tilde{f}_r(\theta) \\ \tilde{f}_a(\theta) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Pro výpočet globálních sil je třeba integrovat lokální síly v mezích od nuly do referenčního úhlu \emptyset s přihlédnutím k i-tému zubu v záběru, kde z je počet zubů frézy

$$\begin{bmatrix} f_x(\emptyset) \\ f_y(\emptyset) \\ f_z(\emptyset) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^z \left(\int_0^{\emptyset} \begin{bmatrix} \tilde{f}_x^i(\theta) \\ \tilde{f}_y^i(\theta) \\ \tilde{f}_z^i(\theta) \end{bmatrix} \right) \quad (5.7)$$

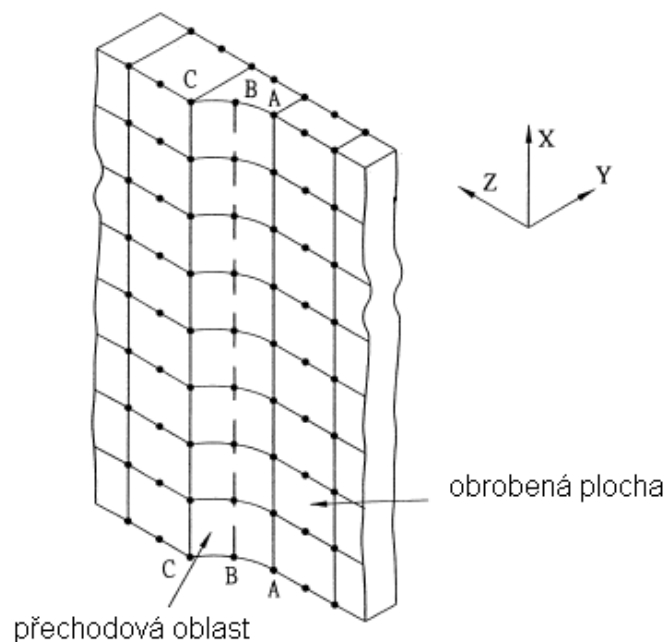
Tato rovnice však nemusí být konečná, protože se jev opakuje periodicky $2\pi/z$, což je perioda záběru zubu. Fourierovou transformací lze vzít v potaz tyto periodicky se opakující frekvenční domény [9].



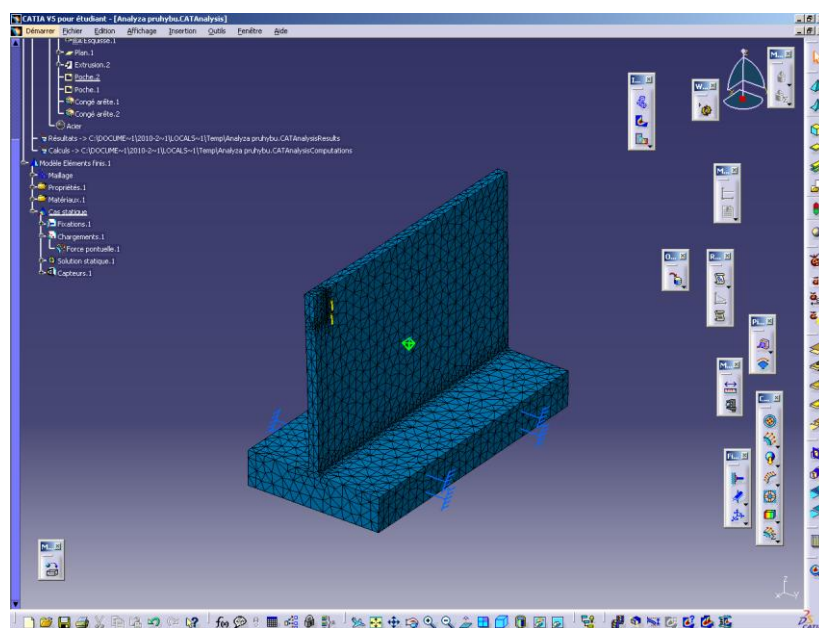
Obr. 5.2 Složky silového zatížení. a) Pohled zhora podél osy z b) Pohled zboku podél osy y, c) Rozložené silové působení na břitu frézy [9]

5.2 Model tenkostěnné součásti

Pro znalost průhybu na volném konci je třeba modelovat tuto součást. Nejlépe k tomu poslouží programy, které využívají MKP, jako např. ANSYS nebo CATIA. Lze do nich součást nakreslit, zvolit materiál a pak ji rozdělit na velký počet malých prvků.



Obr. 5.3 Sítování modelu tenké stěny pomocí MKP [17]



Obr. 5.4 Síťování modelu stěny v programu CATIA

Pro zjištění výsledného vychýlení je třeba:

- vypočítat matici tuhosti struktury poskládanou z matic pro každý element
- znát silové zatížení celku
- určit okrajové podmínky

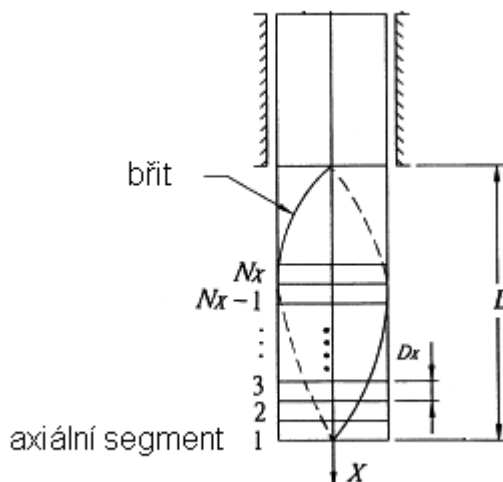
Podle vztahu (5.8) lze vypočítat posunutí v jakémkoli uzlu

$$\{Q\} = [K] \cdot \{q\} \quad , \quad (5.8)$$

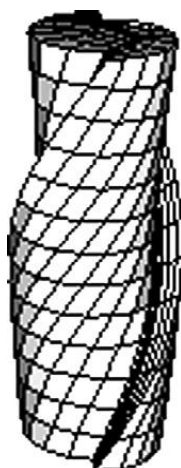
kde $\{Q\} = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}^T$ je vektor reprezentující složky vnějších zatížení (v uzlech) včetně reakcí a $\{q\} = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}^T$ je vektor složek posunutí uzlů dané soustavy, díky němuž je možné znát výchylku na volném konci stěny.

5.3 Model nástroje

V [17] je modelován také nástroj ve tvaru prutu podle Timoshenka. Ten bere v potaz vedle tahu - tlaku a ohybu ještě posouvající sílu. Na Obr. 5.5 je nástroj rozdělen na N dílků v řezné části o tloušťce D_x . Vychýlení na konci nástroje lze vypočítat robněž podle vztahu (5.8). Délka vyložení je L . V jiných pracích se však vychýlování nástroje neuvažuje, předpokládá se totiž, že proti vychýlení stěny je vychýlení nástroje zanedbatelné.



Obr. 5.5 Model nástroje [17]



Obr. 5.6 Síťování modelu nástroje pomocí MKP [6]

5.4 Optimalizace trajektorie nástroje

Díky silovému modelu a modelizaci stěny lze simulovat proces obrábění. Na stěnu jsou postupně po celé délce L aplikovány vypočtené síly a v každém j -tém bodě je zde simulovaná výchylka stěny. Řezy A-A a B-B na Obr. 5.7 indikují roviny vychýlení. Pro bod j ($j=1, 2, \dots, n$) y_0 značí nominální řezný bod, u je vychýlení obrobku a y_p je předpokádaný řezný bod bez kompenzace. Deflekce u v každém bodě j se dá vypočítat jako:

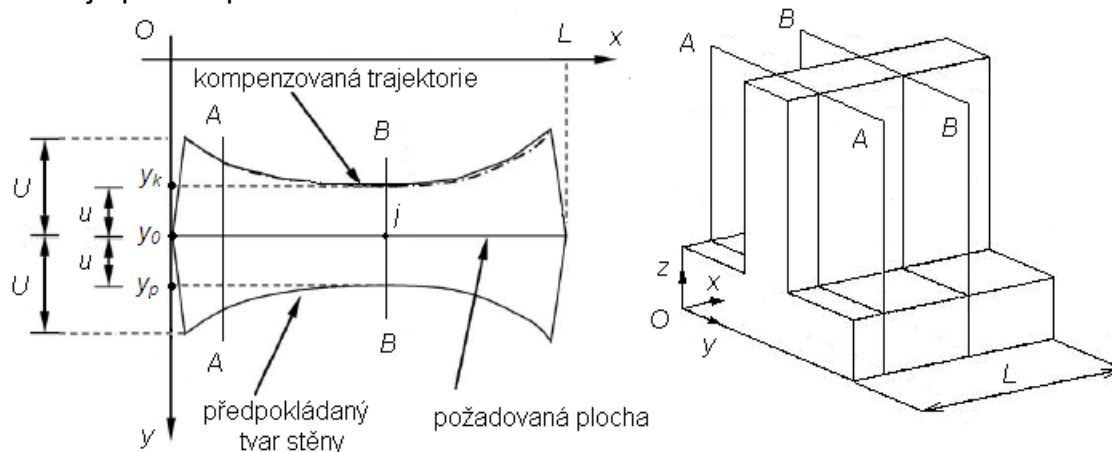
$$u_j = y_{pj} - y_0 \quad (5.9)$$

Aby byla tato chyba kompenzována, je třeba, aby byla modifikována pozice nástroje z y_0 do kompenzované pozice y_k o hodnotu u . Aktuální pozice nástroje v bodě j po kompenzaci lze vyjádřit vztahem:

$$y_{kj} = y_0 - u_j$$

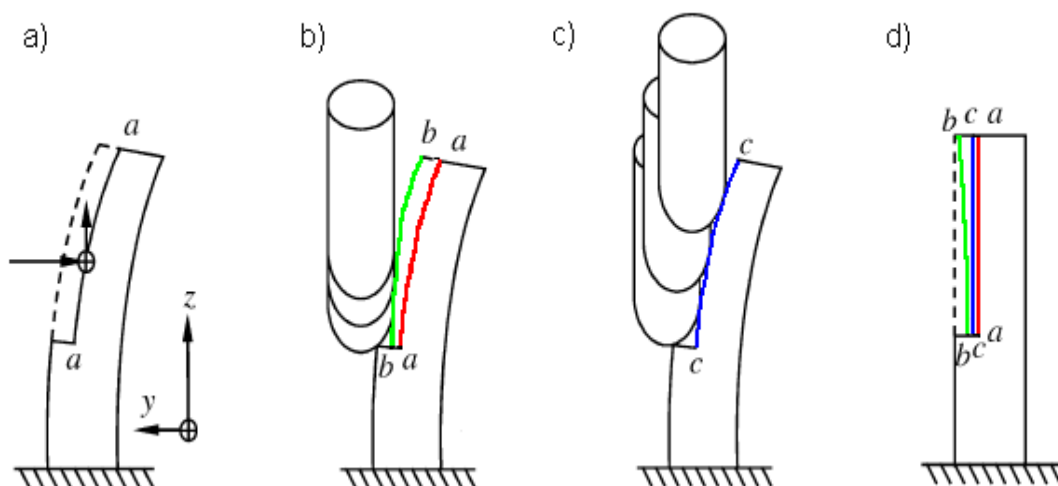
(5.10)

Výpočet se pak aplikuje po celé délce L stěny a je tak určena trajektorie nástroje po kompenzaci.



Obr. 5.7 Předpokládaný tvar stěny po vychýlení a kompenzovaná trajektorie nástroje [13], U a V značí maximální vychýlku na kraji stěny

Kompenzace se děje v celé rovině vychýlení, tudíž i v ose z a lze pozorovat, že vychýlka se zvyšuje směrem k hornímu konci stěny. Na Obr. 5.8 je znázorněna stěna kde aa značí požadovanou plochu k odebrání, bb je odebraná plocha bez kompenzace chyb a cc je upravená trajektorie nástroje. Výsledná součást pak splňuje předepsané geometrické požadavky.



Obr. 5.8 Algoritmus obrábění při použití NC kompenzace chyb [13]. a) Síly vyvolávající vychýlení obrobku b) Obrábění výchozí stopou nástroje c) Obrábění modifikovanou stopou nástroje d) Požadovaná přesnost pro úsečku cc

6 PRAKTICKÝ EXPERIMENT

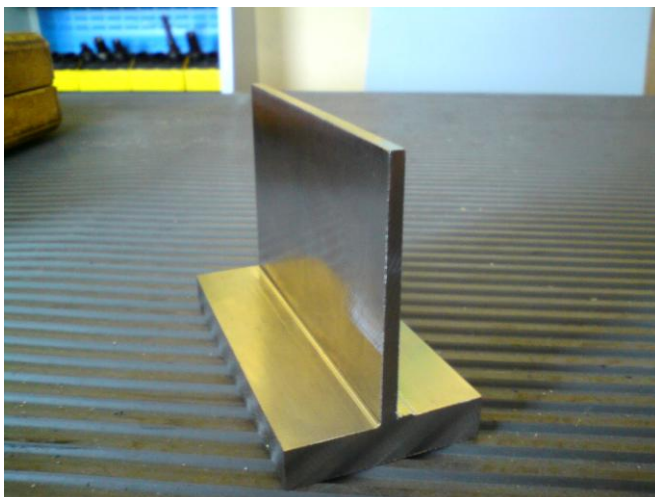
Cílem experimentu bylo srovnání deflekce při reálném obrábění s teoretickým modelem daným výpočtem a programem CATIA. Rozměry součásti byly určeny přibližně tak, aby poměr výšky k tloušťce byl menší než 15:1, Obr. 6.15.

6.1 Realizace součásti a pozorování deflekcí

Geometrie součásti se nejdříve zhotovila čelním nesousledným frézováním, poté proběhla kontrola, jak se obráběním součást zdeformovala. Pak byl proveden dokončovací řez a na součásti byly zkoumány deflekce a reálná odebraná radiální šířka pomocí měřicích metod.

6.1.1 Čelní frézování geometrie součásti

Uvažovaná tenkostěnná součást byla zhotovena na svislé konzolové frézce. Jako materiál byla použita nástrojová ocel X38CrMoV5 (dle ČSN 19 552). Z polotovaru tvaru kostky 80 x 40 x 60 mm byla postupně ($a_p=0,5$ mm) čelním frézováním odebrána z každé strany axiální šířka 18,5 mm a radiální šířka 50 mm, až zůstala tloušťka stěny 3 mm, Obr. 6.1. Byly použity břitové destičky z povlakovaného SK výrobce Sandvik Coromant, označení GC3040 (ISO P30), určené pro hrubování kalených ocelí středními rychlostmi.

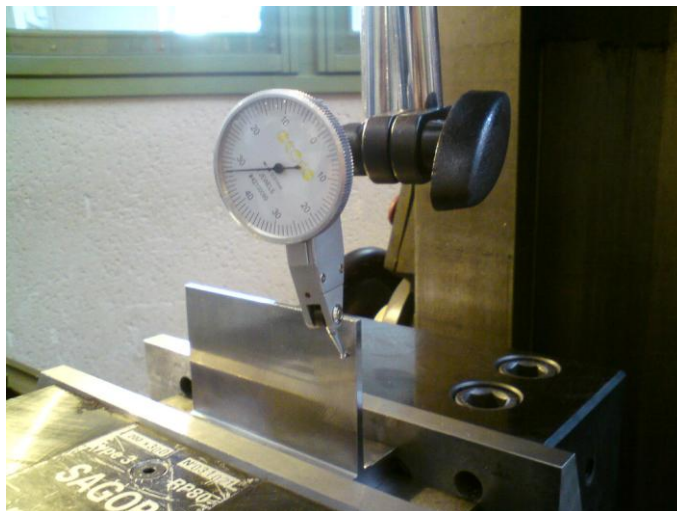


Obr. 6.1 Vyrobená součást z materiálu X38CrMoV5

6.1.2 Kontrola tvaru stěny

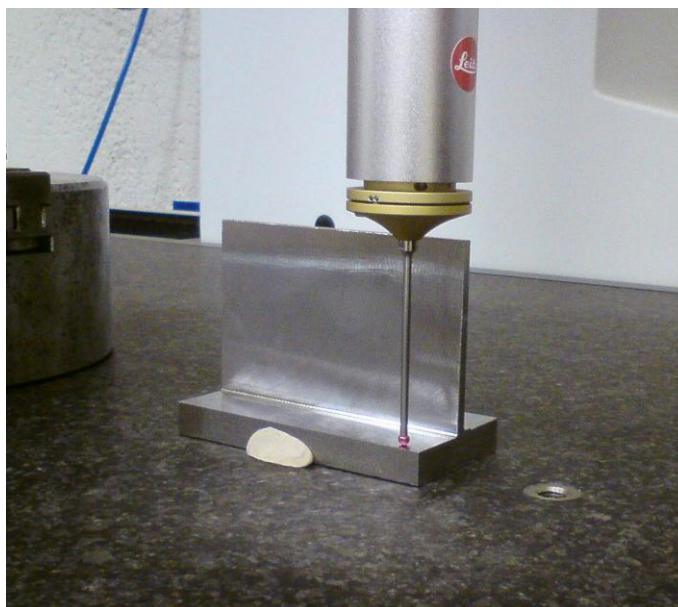
Tato etapa experimentu měla ukázat, nakolik již byla součást předchozím obráběním zdeformována. Zkoumala se jen ta strana stěny, kde byl následně proveden dokončovací krok. K tomu posloužily dva měřicí přístroje: číselníkový

úchylkoměr (rozlišení 0,01 mm) a souřadnicový přístroj Global Dea Performance (rozlišení 0,001 mm) asistovaný programem PC-DMIS CAD++.






Obr. 6.2 Měření součásti pomocí číselníkového úchylkoměru.

Měření číselníkovým úchylkoměrem ukázalo, že stěna je oproti spodní části vychýlena o $-0,37 \pm 0,04$ mm. Po celé délce střední části stěny byl navíc oproti krajům pozorován příbytek materiálu v rozmezí od 0,05 - 0,1 mm.



Obr. 6.3 Měření součásti před obrobením pomocí souřadnicového měřicího přístroje.

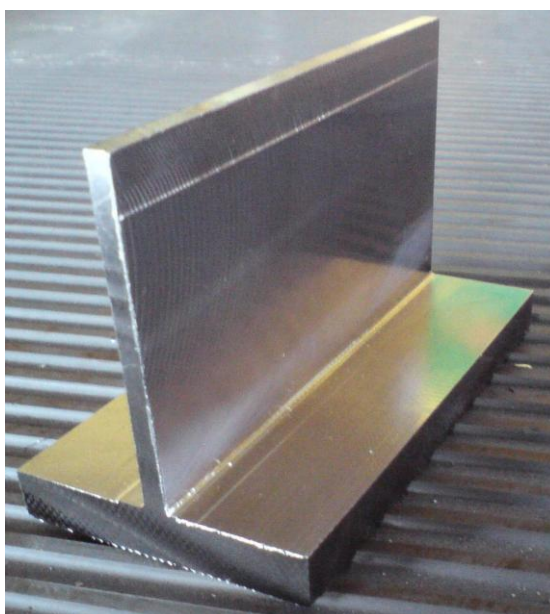
Souřadnicovým měřicím přístrojem byla měřena rovinnost vertikální obrobené plochy (PLAN1), rovinnost horizontální plochy (PLAN2) a následně kolmost mezi nimi. Hodnoty jsou uvedeny v mm na obr. 6.4 ve sloupci MESU.

		NOM DE PIÈCE : Paroie_fine_brute_V1				mai 17, 2011		11:12	
		NUMÉRO DE RÉVISION :			NUMÉRO DE SÉRIE :			COMPTE STAT. : 1	
		MM	PLAT1 - PLAN1						
AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
M	0.0000	0.0100	0.0000	0.0672	0.0672	0.0572			
		MM	PLAT2 - PLAN2						
AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
M	0.0000	0.0100	0.0000	0.0257	0.0257	0.0157			
		MM	PERP1 - PLAN1 VERS PLAN2						
AX	VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL			
M	0	0.0100	0	0.2062	0.2062	0.1962			

Obr. 6.4 Výsledky měření na souřadnicovém měřicím přístroji.

6.1.3 Válcové frézování na volném konci stěny

Z volného konce stěny se válcovým nesousledným frézováním odebrala radiální šířka $a_e=0,2$ mm a axiální šířka $a_p=8$ mm. Použity byly cermetové břitové destičky výrobce Sandvik Coromant, označení výrobce R390-17 04 08E-PL, CT530 (ISO H25), určené pro dokončování kalených ocelí. Použitá fréza byla také od výrobce Sandvik Coromant, označení R390-050Q22-11M. Frézování mělo parametry: $z=5$, $f_z=0,087$ mm/zub, $D=50$ mm, $v_c=90$ m/min, $N=574$ ot/min, $v_f=250$ mm/min. Při frézování bylo slyšitelné zvonění součásti.



Obr. 6. 5 Součást po dokončovacím kroku.

6.1.4 Měření vychýlení

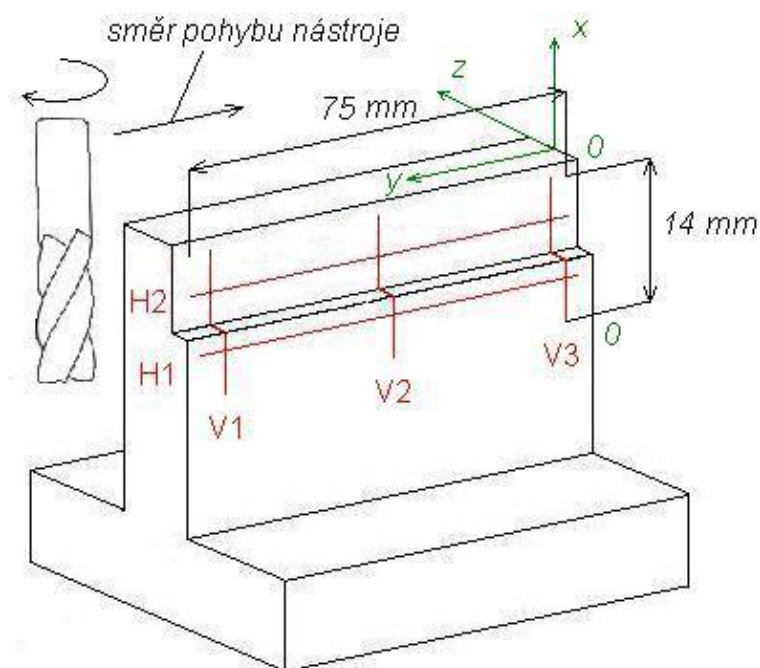
Součást byla po obrábění podrobena několika měřením. Cílem bylo zjistit, zdali nastavená radiální šířka řezu 0,2 mm byla skutečně odebrána, a pokud

ne, kde a do jaké míry vznikly deflekce. Byl pro to použit přístroj Surfscan Somicronic (rozlišení 0,001 mm).

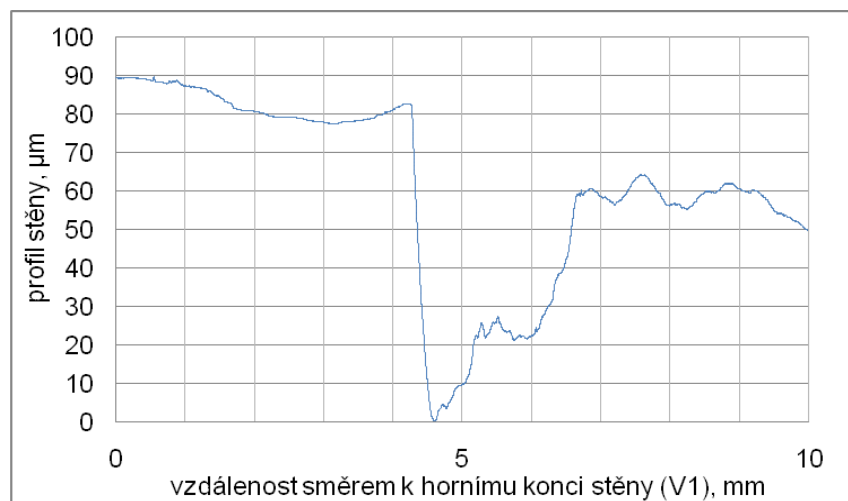


Obr. 6.6 Měření profilu stěny na přístroji Somicronic.

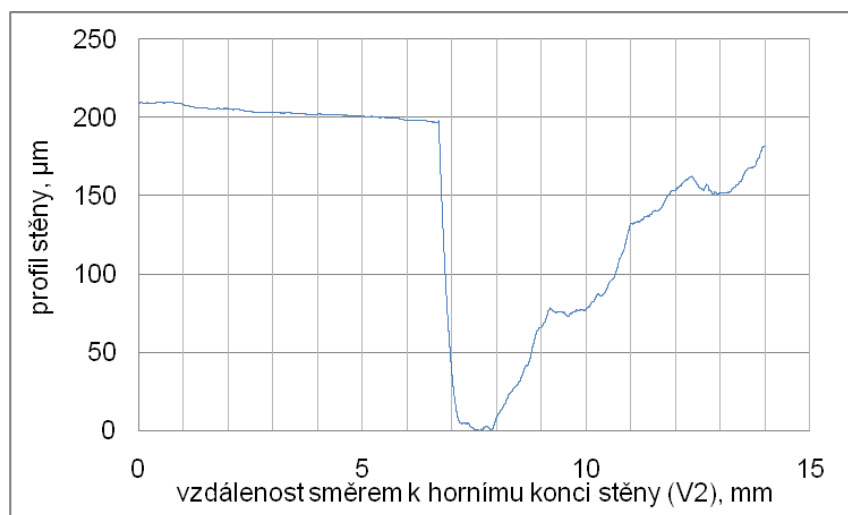
Ve směru horizontálním byla součást měřena podél červených úseček ve směru opačném, než bylo předchozí obrábění, Obr. 6.7.



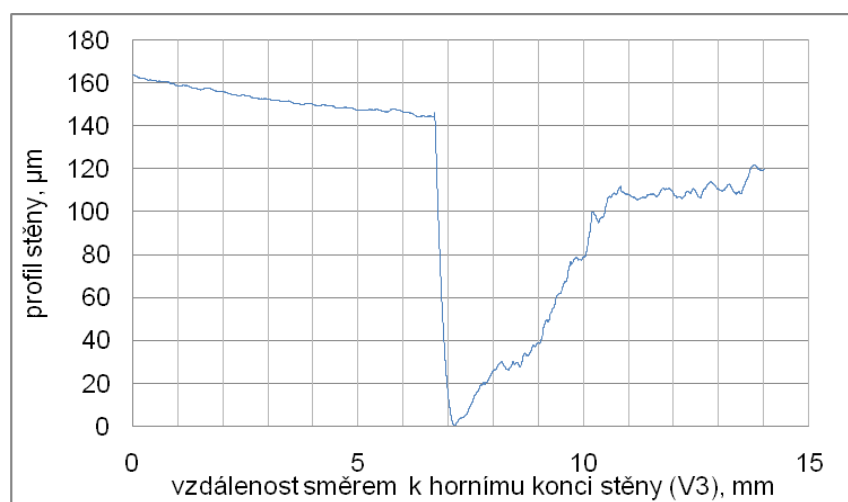
Obr. 6.7 Naznačené oblasti měření.



Obr. 6.8 Profil obrobené plochy po zajetí nástroje.



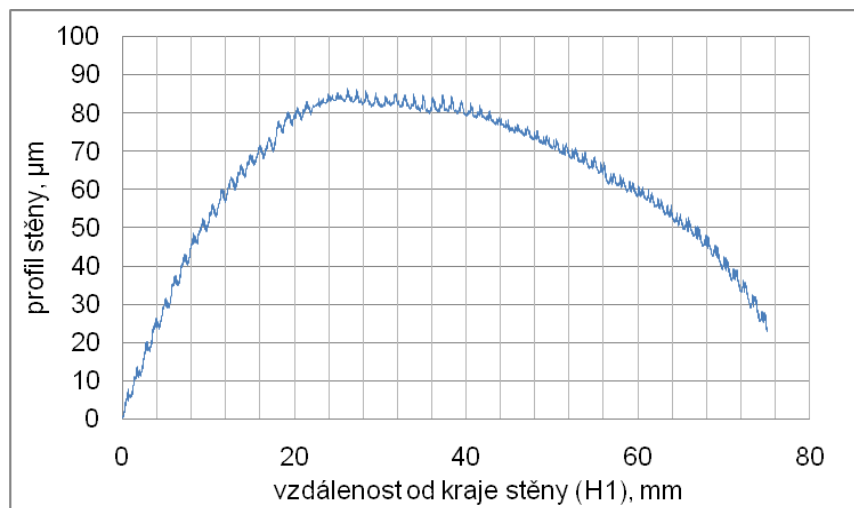
Obr. 6.9 Profil uprostřed stěny.



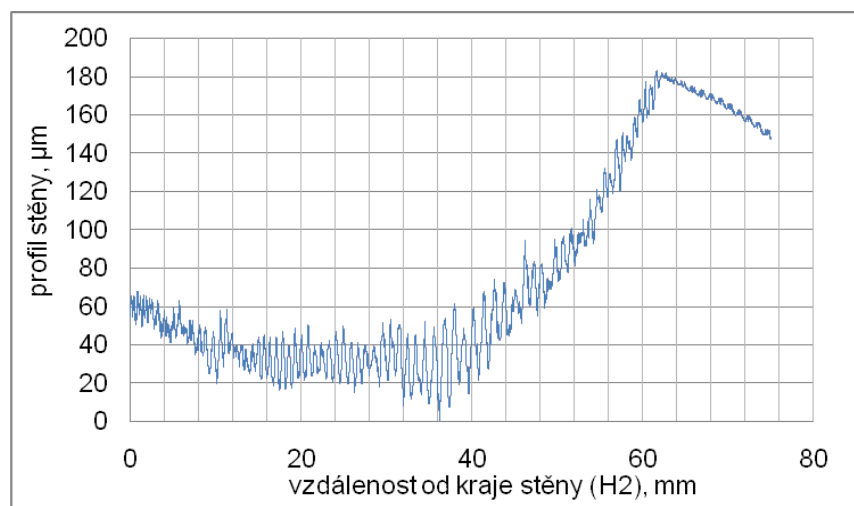
Obr. 6.10 Profil obrobené plochy po vyjetí nástroje.

Na obr. 6.8, 6.9 a 6.10 lze pozorovat reálný úběr materiálu. V nejspodnější části obrobené plochy byl materiál odebrán nejvíce, ve střední části to byla

nastavená hodnota a_e 0,2 mm. Směrem k hornímu konci však materiál přibývá, což je způsobeno vychýlením během obrábění a tudíž nemohla být odebrána nastavená radiální šířka.



Obr. 6.11 Profil stěny těsně pod obrobenou plochou.

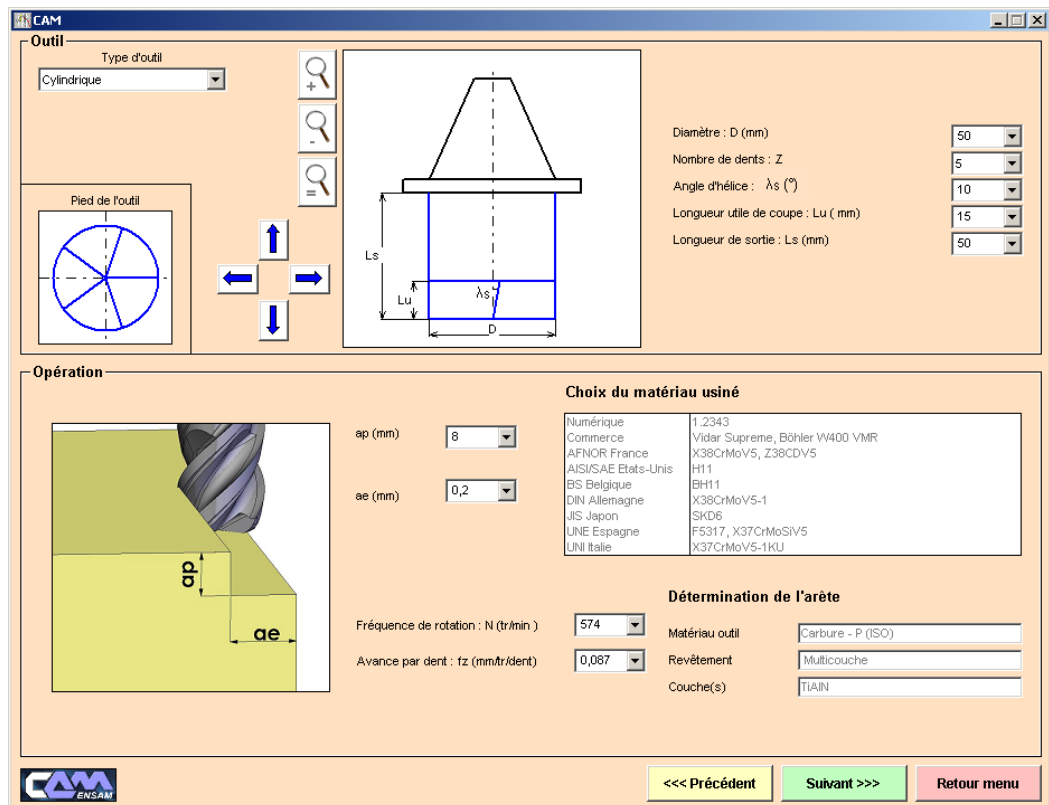


Obr. 6.12 Profil obrobené plochy podél usečky H2

Na obr. 6.11 lze pozorovat profil stěny těsně pod obrobenou plochou. Zde je patrný přebytek materiálu ve střední části stěny. Obr. 6.12 ukazuje maximální hloubku odebranou ve střední části stěny. Na profilu je patrné, že řez byl nestabilní a byly při něm vibrace.

6.2 Výpočet složek silového zatížení

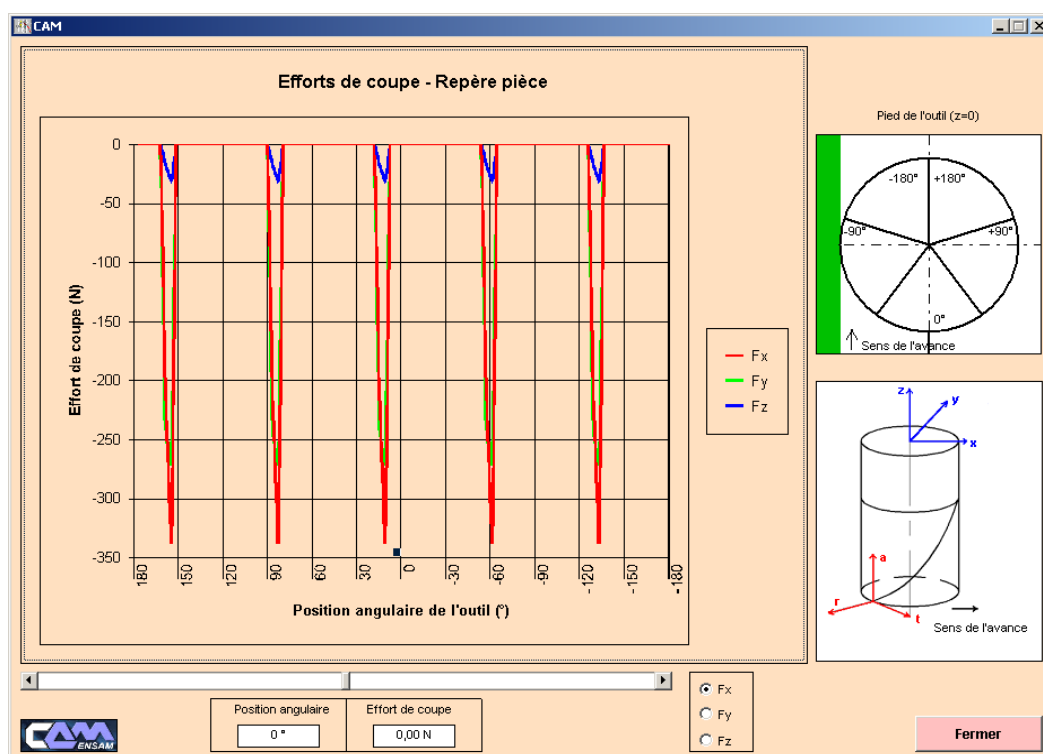
Za pomoci programu CAM (Couple Arête Matière) byly po vložení řezných podmínek zjištěny jednotlivé složky silového zatížení. Pro simulaci byla jako materiál použita nástrojová ocel X38CrMoV5 (dle ČSN 19 552).



Obr. 6.13 Vložené parametry obrábění do programu CAM

Tab. 6.1 Legenda k programu CAM

Nástroj		Operace	
válcová fréza		axiální šířka řezu	8 mm
průměr	50 mm	radiální šířka řezu	0,2 mm
počet zubů	5	otáčky vřetena	574 ot/min
úhel náklonu ostří	10°	posuv na zub	0,087 mm/zub
použitelná délka ostří	15 mm		
délka vyložení	50 mm		
Destička		Obrobek	
materiál	SK	materiál	X38CrMoV5
povlak	vícevrstvý TiAlN		

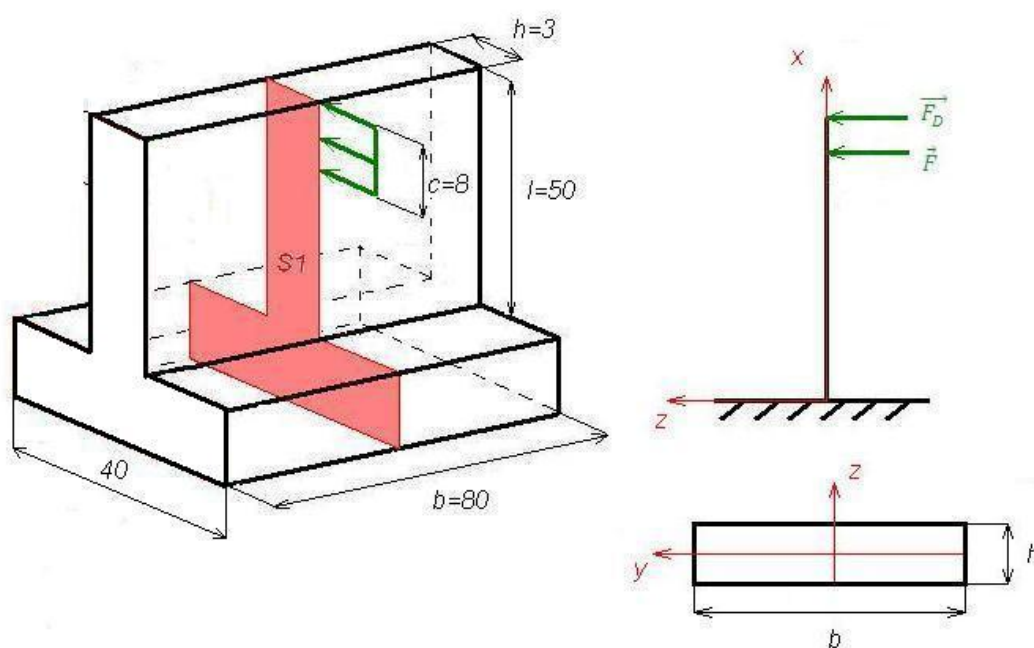


Obr. 6.14 Zjištěné složky silového zatížení

Velikost sil pomocí programu CAM je $F_x = -340\text{N}$, $F_y = -269\text{N}$, $F_z = -34\text{N}$.

6.3 Výpočet vychýlení součásti

Součást měla rozměry podle obr. 6.15. Rozměry jsou v mm, síla F vypočtená pomocí programu CAM je 340 N.



Obr. 6.15 Rozměry součásti a souřadný systém

Pro zjištění vychýlení na konci stěny byla přidána doplňková síla F_D a použita teorie prutů podle vzorce (6.1).

$$w_F = \frac{\partial W}{\partial F} = \frac{1}{E} \cdot \int_0^l \frac{M_y(x)}{J_y(x)} \cdot \frac{\partial M_y(x)}{\partial F} \cdot dx + \frac{\beta}{6} \cdot \int_0^l \frac{T_z(x)}{G(x)} \cdot \frac{\partial T_z(x)}{\partial F} \cdot dx + \frac{1}{G} \cdot \int_0^l \frac{M_k(x)}{J_p(x)} \cdot \frac{\partial M_k(x)}{\partial F} \cdot dx \quad (6.1)$$

Vliv posouvající síly byl zanedbán kvůli velkému poměru mezi tloušťkou a délkou stěny. Síla byla aplikována uprostřed stěny (řez S1), jak je znázorněno na Obr. 6.2.

Kvadratický moment pro obdélníkový průřez mají tvar

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (6.2)$$

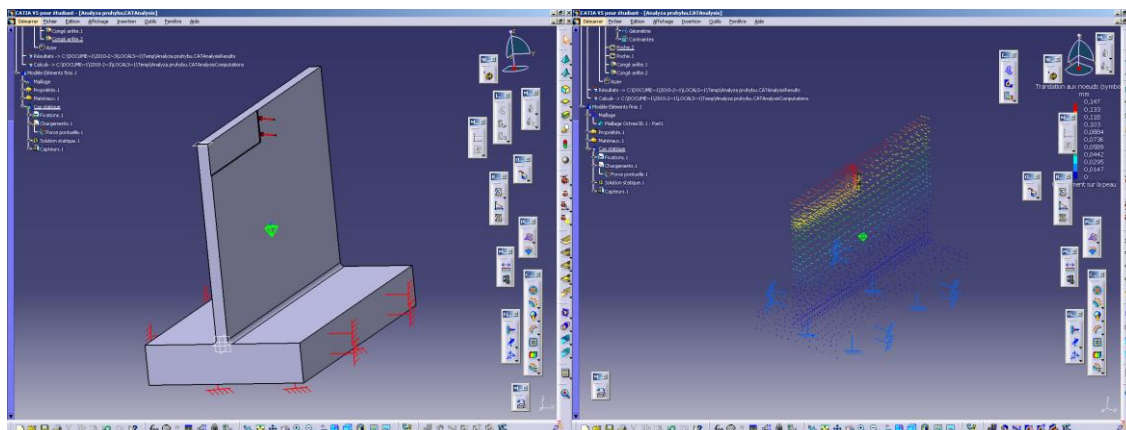
Vychýlení stěny v řezu S1 lze tedy po dosazení (6.2) do vzorce (6.1) vyjádřit vzorcem

$$w_F = \frac{12}{E \cdot b \cdot h^3} \cdot \left(\frac{F \cdot l^3}{3} - 2 \cdot F \cdot l^2 \right) \quad (6.3)$$

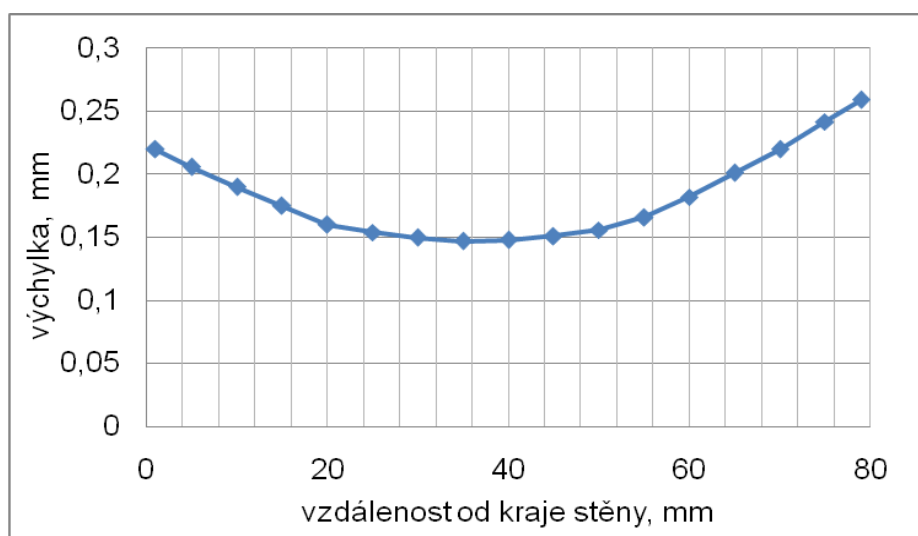
Výsledné vychýlení stěny na jejím horním konci pod silou F je rovno 0,3298 mm.

6.4 Modelizace součásti v programu CATIA

Součást byla vymodelována v programu CATIA podle rozměrů z Obr. 6.15. Byla síťována pomocí trojúhelníkových elementů. Na přechodovou plochu byly po celé délce stěny aplikovány vypočtené síly z CAMu a spuštěn výpočet. Výsledné hodnoty vychýlení jsou zaznamenány na Obr. 6.17.



Obr. 6.16 Modelovaná součást v CATII.



Obr. 6.17 Výchylka stěny po aplikaci sil podél součásti daná programem CATIA.

ZÁVĚR

Tato práce se zabývá problematikou obrábění tenkostěnných součástí. Nastíněná problematika spočívá především v deflekcí této stěny v důsledku její malé stability a sil, které na ní působí. Tím vzniká geometrická nepřesnost. Pomocí měřicích metod se dá tato výchylka sledovat po celé délce stěny. I teoretickým modelem lze tuto výchylku určit, je k tomu však potřeba znát celou řadu parametrů, a u tenkostěnných součástí se dále objevuje fenomén vibrací, který je složitě předvídatelný.

Účinná metoda, která s deflekcí počítá, se nazývá NC kompenzační metoda. Ta v závislosti na míře vychýlení stěny přizpůsobí stopu nástroje tak, aby výsledný tvar stěny odpovídal předepsané přesnosti.

Praktická část popisuje experiment obrábění tenkostěnné součásti a její následné měření. Zde je patrná problematika vychýlení jak na horním konci stěny, tak na jejích bocích, a tím pádem neodebrání potřebného materiálu. Modelizace v programu CATIA se ukázala přesnější pro odhad dané problematiky, než výpočet pomocí teorie prutů, který poskytuje pouze hrubý odhad vychýlení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- 1) TLUSTY, J.; SMITH, S. and WINFOUGH, W. R. *Techniques for the use of Long Slender End Mills in High-Speed Milling*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1996, vol. 45, no. 1, pp. 393-396. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B8CXH-4P3KRDP-30/2/9a225558b4e6b75599d7d4e67762aa5e>. ISSN 0007-8506.
- 2) Sandvik Coromant [online]. [cit. 2010-12-13]. Dostupné z: <http://www.coromant.sandvik.com/>
- 3) BUDAK, Erhan; and ALTINTAS, Yusuf. *Modeling and Avoidance of Static Form Errors in Peripheral Milling of Plates*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 3, 1995, vol. 35, no. 3, pp. 459-476. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6V4B-3YMWK7S-2C/2/2cad0e04f48c52000f831678fee0d945>. ISSN 0890-6955.
- 4) AIJUN, Tang; and ZHANQIANG, Liu. *Deformations of Thin-Walled Plate due to Static End Milling Force*, Journal of Materials Processing Technology, 9/12, 2008, vol. 206, no. 1-3, pp. 345-351. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6TGJ-4RH94SK-1/2/d95db1a9957aaa7c655fd305e370949a>. ISSN 0924-0136.
- 5) BOYER, R. R. *An Overview on the use of Titanium in the Aerospace Industry*. Materials Science and Engineering: A, 8/15, 1996, vol. 213, no. 1-2, pp. 103-114. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6TXD-3VS92GC-K/2/738350e6801d70f8c14a047edcc679e3>. ISSN 0921-5093.
- 6) GANG, Liu. *Study on Deformation of Titanium Thin-Walled Part in Milling Process*. Journal of Materials Processing Technology, 3/19, 2009, vol. 209, no. 6, pp. 2788-2793. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6TGJ-4STGRTR-2/2/b233f32eab5265133e1c649fba7f1552>. ISSN 0924-0136.
- 7) AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praxi*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o. 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- 8) Youtube-obrábění [online]. [cit. 2011-02-02]. Dostupné z: <http://www.youtube.com/watch?v=LtE2J9MrXY>
- 9) ZHENG, Li; CHIOU, Yun Shun and LIANG, Steven Y. *Three Dimensional Cutting Force Analysis in End Milling*. International Journal of Mechanical Sciences, 3, 1996, vol. 38, no. 3, pp. 259-269. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6V49-3VV70CN-B/2/73abd6542dc49ab9cc87fbe792049ddc>. ISSN 0020-7403.
- 10) Vargel, C., *Corrosion de l'aluminium*, 1. vydání Dunod, Paříž, 1999, ISBN 2-10-004191-6
- 11) RATCHEV, Svetan, et al. *Force and Deflection Modelling in Milling of Low-Rigidity Complex Parts*. Journal of Materials Processing Technology, 12/20,

- 2003, vol. 143-144, pp. 796-801. Dostupné z:
<<http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6TGJ-48H89BC-4/2/f733c6b6ec7a8a39c919794ca3c7a969>>. ISSN 0924-0136.
- 12) Graham T. Smith, *Cutting Tool Technology*, Industrial Handbook, Springer-Verlag London Limited 2008, ISBN 978-1-84800-204-3
- 13) RATCHEV, S.; LIU, S. and BECKER, A. A. *Error Compensation Strategy in Milling Flexible Thin-Wall Parts*. Journal of Materials Processing Technology, 5/15, 2005, vol. 162-163, pp. 673-681. Dostupné z:
<<http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6TGJ-4FTXXMW-6/2/520291c467a9e6ae6fb4407e9da0bc0a>>. ISSN 0924-0136.
- 14) RATCHEV, S., et al. *Milling Error Prediction and Compensation in Machining of Low-Rigidity Parts*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 12, 2004, vol. 44, no. 15, pp. 1629-1641. Dostupné z:
<<http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6V4B-4D4D0J5-2/2/5f16dcecc91b7378559a6327ed0e8d82>>. ISSN 0890-6955.
- 15) HE, Ning, et al. *Precision Machining of Thin-Walled Workpiece by NC Compensating Deflection*. INASAKI, Ichiro ed., Springer US, 2002. ISBN 978-0-306-47000-4.
- 16) LECHNIAK, Zbigniew, et al. *Methodology of Off-Line Software Compensation for Errors in the Machining Process on the CNC Machine Tool*. Journal of Materials Processing Technology, 4, 1998, vol. 76, no. 1-3, pp. 42-48.
Dostupné z:
<<http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6TGJ-3TW4F2K-9/2/9274124dbd524c63b099dca59c4d3299>>. ISSN 0924-0136.
- 17) TSAI, Jer-Shyong; and LIAO, Chung-Li. *Finite-Element Modeling of Static Surface Errors in the Peripheral Milling of Thin-Walled Workpieces*. Journal of Materials Processing Technology, 9/29, 1999, vol. 94, no. 2-3, pp. 235-246.
Dostupné z:
<<http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/B6TGJ-3Y9N4SX-W/2/18bf9ad58f2a40c579fb8969b258203f>>. ISSN 0924-0136.
- 18) Trent, Edward M., Wright, Paul K., *Metal cutting, fourth edition*, vyd. Butterworth-Heinemann, 2000, ISBN 0-7506-7069-X
- 19) Leyens, C., Peters. M., *Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Applications*, vyd. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003, ISBN 3-527-30534-3
- 20) MICHNA, Š., *Rozdělení Al-slitin do skupin*, [Online], [cit 2011-5-15], dostupné na <http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/rozdeleni_AL_slitin.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
a_e	mm	radiální záběr nástroje (radiální šířka řezu)
a_p	mm	axiální záběr nástroje (axiální šířka řezu)
CAD		Computer Aided Design (modelování geometrie součásti za pomoci počítače)
CAE		Computer Aided Engineering (modelování zatížení a deformací pomocí počítače)
CAM		Computer Aided Manufacturing (modelování obráběcího procesu za pomoci počítače)
CNC		Computer Numerical Control (číslicové řízení pomocí počítače)
CVD		Chemical Vapor Deposition (chemické naprašování)
ČSN		Česká technická norma
D	mm	průměr frézy
E	MPa	Youngův modul
EN		Evropská norma
EN AW		Evropská norma pro tvářené hliníkové slitiny
f_a	N	axiální složka síly
f_r	N	radiální složka síly
f_t	N	tečná složka síly
f_x, f_y, f_z	N	síly v kartézském souřadném systému
F_D	N	doplňková síla
f_z	mm/zub	Posuv na zub
G	MPa	modul pružnosti v krutu
h	mm	tloušťka třísky
ISO		Mezinárodní organizace pro normalizaci
J_p	mm^4	polární kvadratický moment
J_y	mm^4	osový kvadratický moment
K	N/mm	matice tuhosti

KM		kompozitní materiály
k_a		axiální konstanta vyjadřující vliv podmínek frézování a materiálu
k_r		radiální konstanta vyjadřující vliv podmínek frézování a materiálu
k_t		tečná konstanta vyjadřující vliv podmínek frézování a materiálu
L_u	mm	použitelná délka ostří
L_s	mm	délka vyložení
M_y	N*m	ohybový moment
M_k	N*m	krouticí moment
MKP		Metoda Konečných Prvků
N	ot/min	otáčky vřetena
NC		Numerical Control (číslicové řízení)
q	N/m	spojité zatížení
q	mm	posunutí uzlu
Q	N	složka vnějšího zatížení
SK		Slinuté Karbidy
t	mm	tloušťka stěny
T_t	°C	teplota tání
T_z	N	posouvající síla
u	mm	výchylka
U	mm	maximální výchylka stěny
v_c	m/min	řezná rychlost
v_f	mm/min	posuvová rychlost
w_F	mm	posunutí pod silou F
W	J	energie napjatosti
z		počet zubů frézy
β		konstanta vyjadřující vliv průřezu prutu
δ	mm	výchylka nástroje
Φ	rad	referenční úhel
λ_s	°	úhel naklonění ostří

ρ	kg/m^3	hustota
θ_1	rad	úhel vstupu nástroje do řezu
θ_2	rad	úhel výstupu nástroje z řezu
\sim		znak vyjadřující lokální systém

